

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS FACTS EN REDES ELÉCTRICAS DE TRANSMISIÓN
MEDIANTE BÚSQUEDA INTELIGENTE**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS FACTS EN REDES ELÉCTRICAS
DE TRANSMISIÓN MEDIANTE BÚSQUEDA INTELIGENTE**

**AUTOR:
DAVID ALBERTO PÉREZ CRUZ**

**DIRECTOR:
CARRIÓN GALARZA DIEGO FRANCISCO**

Quito, Octubre 2017

David Alberto Pérez Cruz

UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS FACTS EN REDES ELÉCTRICAS DE TRANSMISIÓN MEDIANTE BÚSQUEDA INTELIGENTE.

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



David Alberto Pérez Cruz (Y'1993-M'06). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Don Bosco "La tola", se graduó de técnico Electrónico. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la ubicación óptima de dispositivos FACTS.
dperezc1@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Diego Francisco Carrión Galarza (Y'1981-SM'12). Se graduó en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2010 y en la actualidad está trabajando para lograr su título de Doctor en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana - Medellín Colombia. Es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana - Quito Ecuador. En la actualidad es miembro del Grupo de Investigación Girei (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes - Smart Grid Research Group).
dcarrion@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

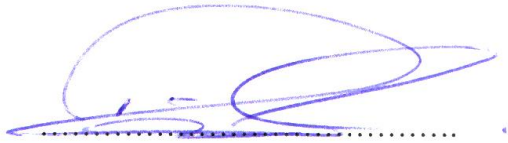
Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS
RESERVADOS
©2017 Universidad
Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo Diego Francisco Carrión Galarza declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Ubicación óptima de dispositivos FACTS en redes eléctricas de transmisión mediante búsqueda inteligente* realizado por David Alberto Pérez Cruz, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Octubre 2017



Diego Francisco Carrión Galarza
Cédula de identidad: 1713703062

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, David Alberto Pérez Cruz, con documento de identificación N° 1718123241, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS FACTS EN REDES ELÉCTRICAS DE TRANSMISIÓN MEDIANTE BÚSQUEDA INTELIGENTE”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



.....

Nombre: David Alberto Pérez Cruz

Cédula: 1718123241

Fecha: Quito, Octubre 2017

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	7
2. UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS FACTS EN REDES DE TRANSMISION..	9
2.1 Modelación de dispositivos FACTS	10
2.2 SVC.....	10
2.3 Función de costo del SVC.....	11
2.4 Metaheurística de búsqueda de armonía (Harmony Search)	11
3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	14
5. CONCLUSIONES	15
6. REFERENCIAS.....	16
6.1 Matriz estado del arte.....	18

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de dispositivos FACTS.....	9
Figura 2. Configuración simplificada de los SVC	11
Figura 3. Curva de costos SVC	12
Figura 4. Esquema de 9 barras de la IEEE.....	14
Figura 5. Resultado costo óptimo de sistema 9 barras	15
Figura 6. Ubicación de SVC sistema IEEE 9 barras	15
Figura 7. Potencia reactiva de sistema IEEE 9 barras.....	16
Figura 8. Perfil de voltaje sistema IEEE 9 barras	16
Figura 9. Resultado costo óptimo sistema de 14 barras	16
Figura 10. Ubicación de SVC sistema IEEE 14 barras	17
Figura 11. Perfil de voltaje sistema IEEE 14 barras	17
Figura 12. Potencia reactiva sistema IEEE 14 barras	17

INDICE DE TABLAS

10.1 Tabla 1. Potencia reactiva, flujo óptimo de potencia sistema 9 barras con GAMS .	13
10.2 Tabla 2. Resultado funcion objetivo Matlab y GAMS caso 1	14
10.3 Tabla 3. Potencia reactiva,flujo óptimo de potencia sistema 14 barras con GAMS	15
10.4 Tabla 4. Resultado funcion objetivo Matlab y GAMS caso 2	15

UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS FACTS EN REDES ELECTRICAS DE TRANSMISIÓN MEDIANTE BUSQUEDA INTELIGENTE

Resumen

En un sistema eléctrico de potencia (SEP) la etapa de transmisión es muy importante ya que es la encargada de llevar la energía eléctrica a grandes distancias, hasta llegar a la etapa de subtransmisión para posteriormente ser distribuida. Se coloca dispositivos FACTS en las barras del sistema para modificar el flujo de potencia existente con la finalidad de aprovechar al máximo la capacidad de las líneas de transmisión, pero ubicar dichos dispositivos en todas las barras implica un costo muy elevado. Es necesario ubicar de manera inteligente dichos dispositivos para lograr el redireccionamiento del flujo de potencia con el menor número de dispositivos posible. En la presente investigación se hace uso de la metaheurística Harmony Search (HS) para la ubicación óptima de dispositivos FACTS en la red de transmisión, tanto SVC como SVR. Se logra ubicar de manera óptima los dispositivos FACTS, minimizando costos y mejorando reactivos y perfiles de voltaje del sistema.

Palabras Clave: Compensador estático VAR, Búsqueda de armonía, Flujo óptimo de potencia, Flujo reactivo, Sistema de transmisión AC flexible.

Abstract

In an electrical power system (SEP) the transmission stage is very important since it is responsible for carrying the electrical energy at great distances, until reaching the stage of subtransmission to be later distributed. FACTS devices are placed on the system bars to modify the existing power flow to maximize the capacity of the transmission lines, but placing these devices in all the bars involves a very high cost. It is necessary to intelligently locate these devices to achieve the redirection of power flow with as few devices as possible. In the present research, the Harmony Search (HS) metaheuristic is used for the optimal location of FACTS devices in the transmission network, both SVC and SVR. FACTS devices are optimally located, minimizing costs, and improving reagents and system voltage profiles

Keywords: Static VAR Compensator, Harmony Search, Optimal power flow, Reactive flow, Flexible AC Transmission System.

1. Introducción

El constante crecimiento de los SEP, se lo relaciona con el desarrollo económico de los países, dicho crecimiento se puede ver reflejado en el aumento de la carga, la misma que en algunos puntos del SEP esta desproporcionada, por ello las empresas encargadas de proporcionar la energía deben cubrir el crecimiento de la demanda cumpliendo con los criterios de confiabilidad y seguridad establecidos en el marco regulatorio [1]. En la actualidad la industria de energía es diferente ya que cada vez tiende a ser más competitiva, es por ello por lo que el funcionamiento óptimo del SEP es muy importante. En un mercado eléctrico los participantes del mismo desean transferir cantidades óptimas de energía mediante el sistema de transmisión para así obtener más ingresos, esto implica que el SEP con frecuencia opere muy cerca de los márgenes de estabilidad y capacidad de carga, provocando así que las líneas se congestionen y que se tenga que invertir una mayor cantidad de dinero en temas como la operación y el mantenimiento del SEP, además de tomar en cuenta de la limitación de los recursos energéticos como también los limitantes económicos [2].

Con el fin de aprovechar al máximo la capacidad de las líneas de transmisión instaladas y evitar que algunas líneas se sobrecarguen, varias empresas pueden brindar soluciones que por lo general son bastante caras y requieren mucho tiempo lo cual no es viable como la construcción de nuevas líneas de transmisión. Pero también existen varias medidas operativas que se pueden tomar en cuenta para mitigar el problema, algunas como: realizar cambios topológicos de la red mediante la conmutación de líneas. Y control del flujo tanto activo como reactivo [3].

Se requiere un cambio en los conceptos tradicionales y las metodologías aplicadas a los SEP, con el fin de utilizar

las capacidades existentes en el mismo para la instalación de nuevos dispositivos como son los Flexible AC Transmission Systems (FACTS).

Los FACTS encajan en el enfoque alternativo, ya que poseen la habilidad de mejorar la eficiencia de las redes existentes, lo hace mediante la redistribución de los flujos de línea, de tal manera que no excedan los límites térmicos establecidos, cumpliendo con los requisitos actuales de la red y resultando en un aumento de la capacidad de carga, mayor seguridad y estabilidad de la red [4].

Los dispositivos FACTS funcionan suministrando o absorbiendo potencia reactiva, así como también reduciendo o aumentando tensión y controlando la impedancia en serie de la línea de transmisión o ángulo de fase. Pero los beneficios de los dispositivos FACTS depende mucho de su tipo, el tamaño, el número y de la ubicación en el sistema de transmisión. Es por eso por lo que existen muchos artículos de investigación acerca del área de localización de dichos dispositivos con el fin de mejorar la operación del SEP.

En [5] aplica la técnica de optimización de búsqueda de armonía para determinar el número óptimo y la localización óptima de los dispositivos FACTS en específico el STATCOM, además de reducir el tamaño del dispositivo y minimizar las pérdidas del sistema. El estudio lo aplicó al sistema de potencia egipcio.

En [6] realiza una interfaz gráfica para la ubicación de los dispositivos FACTS usando la técnica de optimización mediante algoritmo genético (GA), lo hace de una manera más completa ya que aborda la posibilidad de colocar varios tipos de dispositivos FACTS simultáneamente como SVC, TCSC, TCVR, TCPST y UPFC, encontrando la ubicación y valores óptimos para los dispositivos mencionados, logrando así maximizar la capacidad de carga del

SEP. Menciona que el dispositivo UPFC es el más efectivo cuando se quiere maximizar la cargabilidad del SEP.

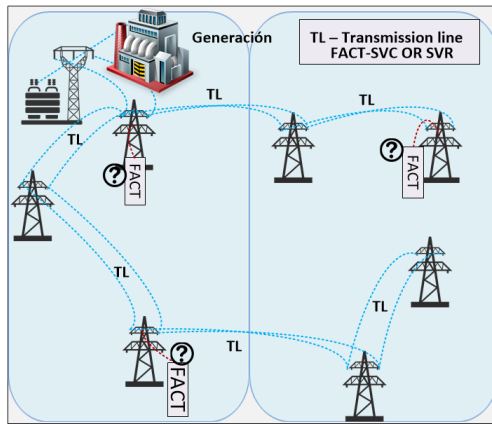


Figura 1. Ubicación de dispositivos FACTS

En [7] aplica un algoritmo genético para ubicar de manera óptima seis tipos diferentes de dispositivos FACTS en la red Hydro-Quebec, además de determinar el valor óptimo de dicho dispositivo, con el fin de aumentar la capacidad de carga del SEP. Menciona que el dispositivo UPFC es el más efectivo cuando se desea aumentar la cargabilidad del sistema.

En [8] usa el método de optimización de enjambre de partículas (PSO) con el fin de resolver flujos óptimos de potencia, pero introduciendo dispositivos FACTS en lugares fijos del SEP para lograr dicho objetivo, además comprueba que es posible el OPF con varias funciones objetivo de interés en un SEP como la minimización del costo del combustible, minimización de pérdidas y la combinación de costo del combustible con la minimización de emisiones.

En [9] presenta dos métodos generalizados con el fin de obtener la ubicación óptima para los dispositivos FACTS tomando en cuenta un conjunto de parámetros fijos, el primer método sin tomar en cuenta la congestión de las líneas, y el segundo tomando en cuenta la congestión de las líneas. Ambos métodos que propone se basan por

completo en la modelación matemática de los dispositivos FACTS, dado que afirma que los métodos meta heurísticos tiene mucha repetitividad en sus resultados y esto hace que el ajuste de la condición inicial no esté garantizado. EL modelo matemático lo hace para tres tipos de dispositivos, UPFC, IPFC y OUPFC.

En [10] propone una localización óptima de dispositivos FACTS mediante un método híbrido que combina forraje bacteriano (BF) y el algoritmo Nelder Mead (NM), para la gestión de la congestión en el SEP, el criterio para la ubicación del TCSC la hace considerando la función del costo del combustible y las emisiones.

En [11] hace una comparación de tres técnicas de optimización: optimización de biogeografía (BBO), optimización de enjambre de partículas (PSO) y WIPSO, con la finalidad de reducir costos, donde toman en cuenta dos dispositivos el SVC y TCSC. Para una mejor seguridad del sistema es conveniente colocar SVC y TCSC simultáneamente, además de mejorar el perfil bajo operación normal y sobrecarga. Además, afirma que la mejor es PSO

En [12] usa el algoritmo de búsqueda gravitacional con el fin de ubicar de manera óptima los dispositivos FACTS, para reducir las pérdidas de potencia activa y el costo de operación del sistema. Para ello toma en cuenta dos de los dispositivos el TCSC y SVC.

En [13] usa un modelo Global Harmony search algorithm (NGHS) para ubicar de manera óptima los dispositivos FACTS, toma en cuenta dos tipos de dispositivos como lo son el SVC y STATCOM. El problema lo descompone en dos sub problemas: el primero es la ubicación del dispositivo mediante análisis modal, y el segundo es para resolver el OPF con NGHS con el fin de minimizar pérdidas de potencia, mejorar la estabilidad y perfil de voltaje. Demuestra que aplicando el NGHS produce menor

perdidas de potencia y un mejor perfil de voltaje, así como mayor estabilidad. Además, compara la búsqueda de armonía mejorado (IHS), PSO con el NGHS, afirmando que el NGHS es superior a los dos en precisión y velocidad, además de que proporciona mejores respuestas.

En [14] usa un algoritmo de búsqueda de armonía mejorado (IHS) para la ubicación de dispositivos SVC. Plantea una función multi objetivo que toma en cuenta el costo de inversión, las pérdidas de potencia activa y el perfil de voltaje del sistema. Además, afirma que el IHS es superior al HS convencional ya que reduce mucho más las funciones objetivo.

En [15] usa un HS para ubicar de manera óptima los dispositivos TCSC, SVC y UPFC. De los cuales los dos primeros los modela como inyección de potencia y el ultimo como modificación de la reactancia de la línea. El problema lo plantea como una función objetivo que maximice la seguridad del SEP ante una contingencia, además de compararlo con el GA concluyendo que HS es mejor que GA para la resolución de este tipo de problemas.

En [16] usa Tabú search (TS) para localizar de manera óptima SVC en un sistema de distribución. Lo plantea en dos capas, la primera para encontrar la óptima ubicación de los dispositivos minimizando costos. Y la segunda es para tomar en cuenta la desviación de voltaje con generación eólica incierta.

En [17] usa TS y Simulated Annealing (SA) para la colocación óptima de SVC. Para lograrlo lo plantea como un problema en el cual se intenta aumentar la máxima transferencia de potencia. El uso de TS y SA va acompañado de análisis modal. De manera que el análisis modal identifica el área en donde se necesita un dispositivo, el SA da una colocación sub óptima en dicha área y el TS da una colocación óptima del dispositivo. Afirma que el análisis modal

y TS dan resultados similares mientras que SA no da un óptimo sino un sub-óptimo.

En [18] aplica una mutación de PSO llamada HMP SO para la ubicación óptima de SVC y TSC en un SEP. Lo plantea como multi objetivo para la localización óptima y aumentar la capacidad de transferencia. Afirma que se puede incrementar la capacidad de transferencia con el uso de FACTS y que PSO es mucho mejor que GA para resolver problemas no lineales.

En [19] se aplica PSO y GA para ubicar dispositivos SVC de manera óptima. Lo propone como la maximización del coeficiente de amortiguación. Demuestra que PSO es superior a GA.

Con el HS se ubica de manera óptima los dispositivos FACTS. Para ello se hace el uso de un OPF, para calcular los flujos reactivos del sistema. Los cuales sirven para realizar una optimización basada en costos de instalación de los dispositivos FACTS.

En adelante esta investigación se organiza de la siguiente manera.

En la sección 2 se introduce la ubicación de los FACTS en las redes de transmisión. En la sección 3 se describe la formulación del problema y el algoritmo de optimización. En la sección 4 se presenta los resultados obtenidos en la presente investigación. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones de este trabajo.

2. Ubicación de dispositivos FACTS en redes de transmisión.

En un sistema eléctrico de potencia cuando se encuentra en funcionamiento normal los niveles de tensión existentes en cada una de las barras del SEP son distintas pero dichos niveles deben estar en un rango permitido para que el SEP opere de manera adecuada, es decir que exista estabilidad.

Pero puede haber una nueva carga que ingrese al SEP, entonces los niveles de tensión cambiarían de una manera distinta para cada caso, pero se debe asegurar que siempre estén dentro de los niveles permitidos de operación. Una manera para lograr mejorar los niveles de tensión, son los dispositivos FACTS.

Los FACTS nos ayudan a mejorar el nivel de voltaje en la barra que se requiera, ya sea que esta tenga un nivel muy elevado de voltaje o un nivel muy bajo de voltaje. Lo que hacen estos dispositivos es inyectar potencia reactiva a manera de un condensador variable al que se le conoce como SVC, si se tiene bajo voltaje. Si se tiene alto voltaje conecta un reactor al que se lo conoce como SVR, todo esto con el fin de mejorar el perfil de voltaje de la barra a la que se está conectando el dispositivo. Pero para saber en dónde debo ubicar un dispositivo FACT necesito conocer el estado actual del SEP para ello es necesario el cálculo de un flujo óptimo de potencia, aquel proporciona datos necesarios para poder ubicar de manera óptima un dispositivo en donde se lo requiera.

Si se habla de una localización óptima se hace uso de una optimización, la cual buscará la mejor ubicación del dispositivo FACT al menor costo posible tomando en cuenta las restricciones pertinentes.

Para encontrar una solución de la optimización existen muchos métodos, algunos son más precisos que otros. Para la ubicación de dispositivos FACTS se registran mejores resultados con la metaheurística Harmony Search, la cual fue creada justamente para optimización.

2.1 Modelación de dispositivos FACTS

El modelo de inyección de potencia es una buena opción para el estudio de dispositivos FACTS porque puede aplicar de una manera sencilla en el

cálculo del flujo de carga. Dicho método es conveniente porque no destruye la matriz de impedancia ni la de admitancia existente en el flujo de potencia, por ese hecho es más fácil de implementar en el mismo [20][21].

Según el tipo de compensación, se llega a tener tres categorías diferentes para los diferentes tipos de dispositivos FACTS: Controladores shunt como lo son los SVC y los STATCOM.

Controladores serie como TCSC TCPST y TCVR.

Los controladores combinados shunt-serie como lo es el UPFC.

Cada dispositivo mencionado tiene diferentes características y se usa para un objetivo específico. La configuración de los dispositivos a usar se muestra en la Fig. 2.

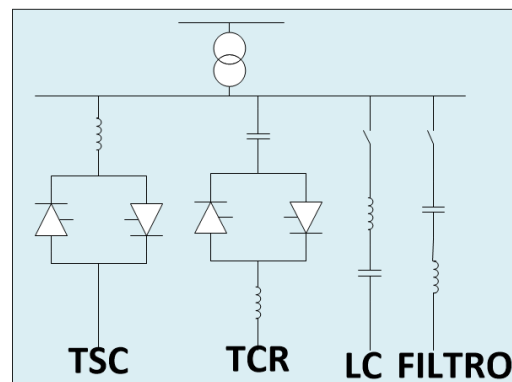


Figura 2. Configuración simplificada de los SVC.

2.2 SVC

El SVC posee elementos controlables como el condensador conmutado por tiristores (TSC) y la reactancia controlada por tiristores, puede operar como compensador capacitivo (TCR), y como compensador reactivo. En el modo capacitivo el dispositivo proporciona potencia reactiva y en modo inductivo el dispositivo absorbe potencia reactiva.

El SVC está modelado por una susceptancia en derivación el cual incluye dos elementos conmutados ideales en paralelo. La capacitancia es para la compensación capacitiva y la

inductancia es para la compensación inductiva. El SVC es el único equipo que puede instalarse en las barras o en las líneas. Si se inserta el dispositivo en una barra del SEP el SVC será modelado como una potencia reactiva inyectada en la barra i .

$$\Delta Q_i = Q_{SVC} \quad (1)$$

Donde:

ΔQ_i es variación de potencia reactiva en el nodo i en MVAR.

Q_{SVC} es el valor de potencia reactiva del dispositivo SVC en MVAR.

Pero al insertar el dispositivo en una línea el modelo equivalente π de la línea de transmisión se modifica, basándose en la susceptancia del SVC [22].

2.3 Función de costos del SVC

La función de costos del SVC se formula de la siguiente forma:

$$C_{SVC} = 0.003s^2 - 0.3051s + 127.38 \quad (2)$$

Donde s es el rango de operación del dispositivo FACT en MVAR.[23]

La ecuación 2 ayuda a determinar el costo de instalación de los SVC, es aplicable para cada nodo del sistema.

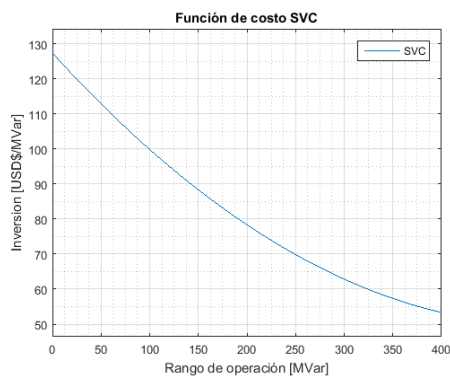


Figura 3. Curva de costos SVC.

Es costo de inversión para un SVC será muy alto si se requiere para bajos MVAR, pero para potencias altas el

costo de inversión del dispositivo baja considerablemente. Por lo que es conveniente establecer un rango específico para ubicar los SVC.

2.4 Metaheurística de búsqueda de armonía (Harmony Search)

En las últimas décadas se han usado una gran cantidad de algoritmos para resolver problemas de ingeniería. Pero los inconvenientes computacionales existentes en los métodos numéricos han obligado a que los investigadores busquen otros tipos de algoritmos como los son las metaheurísticas. La característica de una metaheurística es que combina reglas y aleatoriedad para imitar a un fenómeno natural.

La heurística HS ha sido usada para resolver algunos problemas de optimización como: optimización de funciones, diseño estructural, enrutamiento de vehículos entre otros. Además, existe la posibilidad de que se pueda combinar con otros algoritmos como PSO o GA[24].

El HS es considerado una técnica de optimización, el cual se inspira en el proceso de improvisación musical, en donde el objetivo de los músicos es encontrar una armonía agradable. La armonía en música es comparable a encontrar un óptimo en un proceso de optimización. Una armonía musical perfectamente placentera está determinada por un patrón estético donde cada nota musical suena con un tono dentro de un rango, un músico intenta siempre producir una pieza musical con una perfecta armonía, así como sucede en un problema de optimización.

Con las similitudes que tienen los dos procesos se puede desarrollar la heurística HS [25].

A continuación, se muestra el pseudo código del algoritmo Harmony Search:

Harmony Search.

Paso 1: Ingreso de parámetros iniciales de HS

Paso 2: Ingreso de la función objetivo $f(x)$.

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_d)^T$$

Paso 3: Inicialización de memoria armónica. (matriz de números reales).

Paso 4: Hacer mientras t sea menor al número de iteraciones.

Generar nuevos armónicos.

Ajuste de tono para nuevos armónicos.

Paso 5: Comprobar condicional

Si(rand> $r_{aceptada}$)

Elegir un armónico existente al azar.

Caso contrario si(rand> r_{pa})

Ajustar el tono aleatoriamente dentro de los límites.

Caso contrario

Generar nuevos armónicos a través de la aleatorización.

Acabar si

Acepta los nuevos armónicos(soluciones) si es la mejor.

Paso6: Encuentra las mejores soluciones actuales.

Terminar

3. Formulación del problema

Cuando se calcula un flujo de potencia los voltajes de algunas barras pueden estar dentro de los rangos permitidos, pero se los puede mejorar introduciendo dispositivos FACTS para poder mejorar el perfil de voltaje, así como la cargabilidad que se le puede aplicar al SEP. Para la ubicación de dispositivos FACTS se tiene que analizar los voltajes resultantes de un flujo óptimo de potencia, así como la potencia reactiva por cada barra, con el fin de colocar en las barras necesarias, pero además de tomar en cuenta el costo que implica colocar dicho dispositivo.

La problemática es minimizar los dispositivos FACTS para que el costo de instalación sea el menor posible, pero a su vez que mejore el perfil de voltaje a través de la potencia reactiva.

3.1 Ubicación óptima de dispositivos FACTS.

Los dispositivos FACTS pueden ser ubicados de manera aleatoria en cualquier parte del SEP, pero para poder obtener un mayor provecho de dichos dispositivos se realiza una selección de cuantos y en qué lugar del SEP deben ser colocados, para ello es necesario conocer algunos datos como son los niveles del voltaje, así como los valores de potencia reactiva que circulan por los nodos del SEP. Los datos requeridos se pueden obtener fácilmente corriendo un flujo óptimo de potencia. Además, es necesario conocer la matriz de conectividad del sistema, con los datos mencionados se puede hacer una optimización del problema descrito. Para ello se considera los siguientes parámetros:

Z_i es el costo de la instalación de los dispositivos FACTS en el nodo i .

X_i es la variable binaria del problema.

$f(x)$ es un vector de función que representa a las restricciones del problema.

$\hat{1}$ es un vector que posee entradas iguales a 1.

Se tiene un problema objetivo que puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\min \sum_{i=1}^N Z_i * X_i \quad (3)$$

Sujeto a

$$f(x) \geq \hat{1} \quad (4)$$

$$G(x) \leq 0 \quad (5)$$

La ecuación (3) considera la minimización de los dispositivos FACTS activos, tomando en cuenta el valor de la potencia reactiva que proviene del flujo óptimo de potencia, la misma que sirve para calcular el costo de los dispositivos FACTS.

La ecuación (4) considera un valor de 1 si el dispositivo FACTS se instalara en el nodo i y 0 si no lo hace. Es una función de variables binarias por lo que solo podrá tomar valores de 0 o 1 según corresponda.

Las restricciones se obtienen de la matriz de conectividad del sistema, para saber las posibles barras en donde podrá ser ubicado un dispositivo FACT, es por ello por lo que se realiza una sumatoria de los nodos interconectados por cada línea y dicha suma tiene que ser mayor o igual a uno.

La ecuación (5) considera un valor de 0 si en el nodo i existe un generador.

El problema expresado en (3) es conocido como una formulación NP-Complete. Por lo tanto, para la resolución del mismo se utilizó una heurística basado en la búsqueda de armonía Harmony Search.

Algoritmo para la ubicación óptima de dispositivos FACTS en líneas de transmisión basado en Harmony Search.

Paso 1: Parametrización de Harmony Search.

Paso 2: Ingreso de función objetivo y restricciones.

Minimizar $f(x)$ sujeto a $x_i \in X_i, i = 1, 2, 3, \dots, N$

Paso 3: Se inicializa la memoria de armonía HM con valores aleatorios, de dimensión HMS(filas) y NVAR(columnas).

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{bmatrix}$$

Paso 4: Hacer mientras iteración actual sea mayor que le máximo número de iteraciones. Improvisar una nueva armonía, considerando el HM, el ajuste de tono y la selección aleatoria.

$$x'_i \leftarrow x'_i + bw * U(-1, 1)$$

Paso 5: Actualizar la HM

Si la nueva improvisación es mejor que el peor valor almacenado en HM.

Reemplazar peor valor con la nueva improvisación.

Paso 6: Verificar Criterio de Parada

Si se ha alcanzado el número de improvisaciones Terminar.

Caso contrario regresar a paso 4.

Terminar

Se dice que existe una optimización si el número de dispositivos FACTS es por lo menos 1 menos que el número inicial de dispositivos.

Para la ubicación óptima de dispositivos FACTS, se realiza el respectivo análisis en el sistema de nueve barras de la IEEE que se observa en la figura 3.

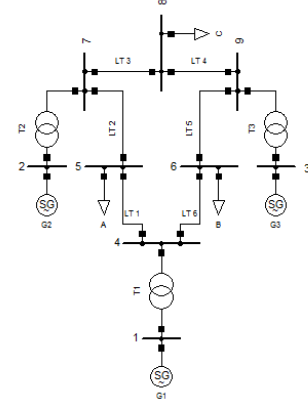


Figura 4. Esquema de 9 barras de la IEEE

El flujo óptimo de potencia se lo calcula en el optimizador GAMS. Para lo cual se usa los siguientes datos de entrada presentados en [26]. Para el sistema de 14 barras se usan los datos presentados en [27].

Los datos necesarios para realizar la optimización es la potencia reactiva por cada nodo, la misma que sirve para determinar el costo de la instalación de los dispositivos FACTS.

Tabla 1: Potencia reactiva flujo óptimo de potencia sistema 9 barras GAMS

Nodos	Potencia reactiva (p.u)
N1	0.747
N2	0.498
N3	0.461
N4	0
N5	-0.500
N6	-0.300
N7	-7.11E-15
N8	-0.350
N9	-7.11E-15

Los valores mostrados en la tabla 1 son los valores resultantes del flujo óptimo de potencia. De la potencia reactiva requerida para la optimización.

4. Análisis de resultados

Los parámetros iniciales como la velocidad de ajuste de banda, el ancho de banda, el rango de variables y la tasa de consideración de armonía se mantienen constantes para cada caso. Lo único que varía es el número de variables, el número de restricciones, el número de memorias armónicas y el número de iteraciones ya que eso depende de cada modelo.

Caso 1:

El modelo escogido es el IEEE de las 9 barras. En la Figura 4 se muestra el costo óptimo de los dispositivos FACTS escogidos para este sistema.

Para obtener el costo óptimo se probó incrementando el número de iteraciones en pasos de 100 hasta llegar a 1000 y en adelante en pasos de 1000 hasta llegar a 5000.

Este modelo posee 9 variables binarias una por cada barra del SEP y 10 restricciones.

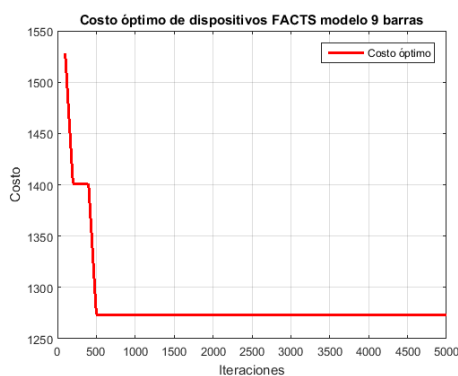


Figura 5. Resultado costo óptimo sistema 9 barras

En la figura 5 se puede observar si las iteraciones son muy pocas la función objetivo que en este caso es el costo

óptimo se aleja mucho de una solución aproximada, tomando en cuenta que es una minimización el valor es muy alto, pero a medida que se tiene más iteraciones llega un punto en donde el costo óptimo se hace insensible ante el aumento de las iteraciones. Ese punto es una solución aproximada que me da la heurística Harmony Search. En la tabla 2 se compara los resultados obtenidos con la heurística propuesta y el optimizador GAMS.

Tabla 2: Resultado Función objetivo Matlab y GAMS caso 1

Función objetivo	Matlab	GAMS
Costo \$/KVAR	1528.600	1528.560

Para validar la heurística propuesta se compara el resultado obtenido en Matlab con el que se obtuvo en GAMS. El valor obtenido en Matlab es un resultado muy aproximado al que se obtuvo en GAMS. Por lo que la heurística propuesta es efectiva.

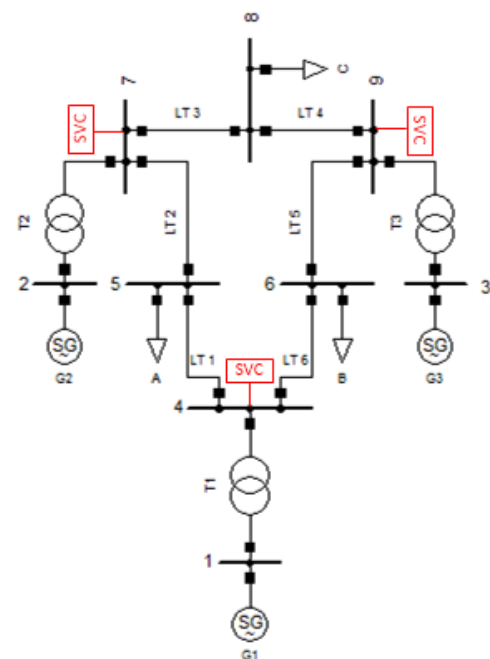


Figura 6. Ubicación de SVC sistema IEEE 9 barras.

En la figura 6 se muestra la ubicación óptima resultante de la metaheurística HS, se observa los SVC en color rojo.

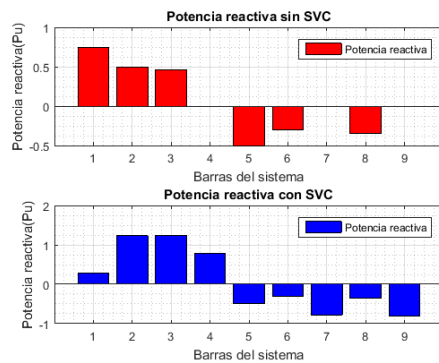


Figura 7. Potencia reactiva sistema IEEE 9 barras.

En la figura 7 se observa que al tener dispositivos SVC presentes en el sistema, la potencia reactiva en las barras se redistribuye y se alivia el flujo reactivo de los generadores.

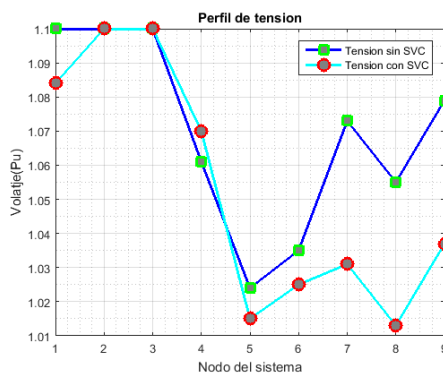


Figura 8. Perfil de voltaje sistema IEEE 9 barras.

En la figura 8 se observa que al colocar dispositivos FACTS en el sistema el voltaje tiende a 1 (p.u.).

Caso 2:

Se prueba en el modelo de la IEEE de 14 barras, en la tabla 3 se muestra los valores de potencia reactiva obtenidos del flujo óptimo de potencia.

Este modelo posee 14 variables binarias con 15 restricciones, con una HM de 14.

Tabla 3: Potencia reactiva flujo óptimo de potencia sistema 14 barras GAMS

Nodos	Potencia reactiva (p.u)
N1	-9.225
N2	-9.057
N3	-1.058
N4	-21.302
N5	-21.943
N6	-10.824
N7	-11.544
N8	9.963E-4
N9	-21.200
N10	-3.875
N11	-0.018
N12	-1.753
N13	-5.217
N14	-1.749

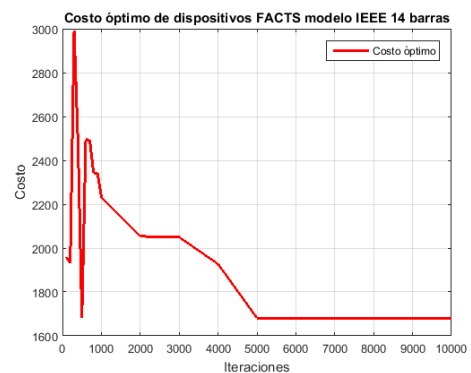


Figura 9. Resultado costo óptimo sistema 14 barras

En la figura 9 se observa que si las iteraciones son muy pocas el costo óptimo no se estabiliza, tomando en cuenta que es una minimización. Pero a partir de un determinado número de iteración el costo óptimo se vuelve insensible al aumento de iteraciones. Por el tamaño del sistema se necesita un número mayor de iteraciones para que la heurística encuentre el costo óptimo de los dispositivos FACTS. El valor que se comienza a repetir es la solución aproximada para este problema.

Tabla 4: Resultado Función objetivo Matlab y GAMS CASO 2

Función objetivo	Matlab	GAMS
Costo \$/KVAR	2912.600	2912.617

Para validar el método propuesto se compara con el resultado obtenido con el optimizador GAMS. La solución encontrada con el software Matlab es muy aproximada a la del optimizador GAMS, por lo que se comprueba que la heurística es efectiva.

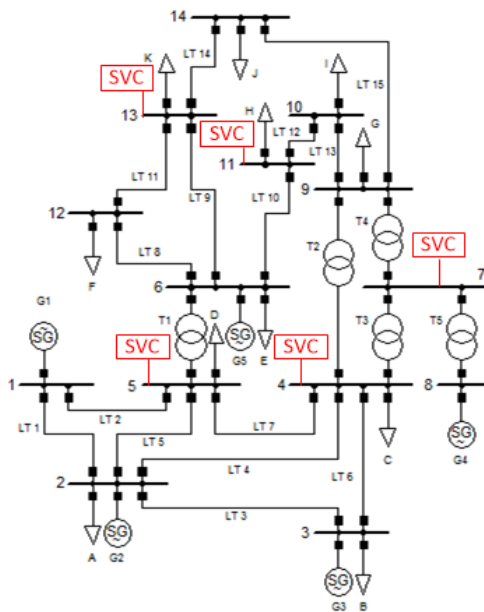


Figura 10. Ubicación de SVC sistema IEEE 14 barras.

En la figura 10 se muestra la ubicación óptima resultante de la metaheurística HS, se observa los SVC en color rojo.

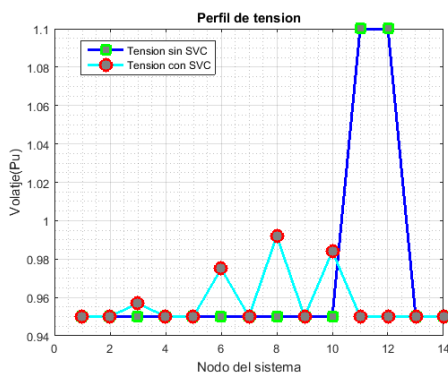


Figura 11. Perfil de voltaje sistema IEEE 14 barras.

En la figura 11 se observa que los perfiles de tensión de algunos nodos mejoran al tener FACTS en el sistema. El voltaje tiende a llegar a 1 en (p.u).

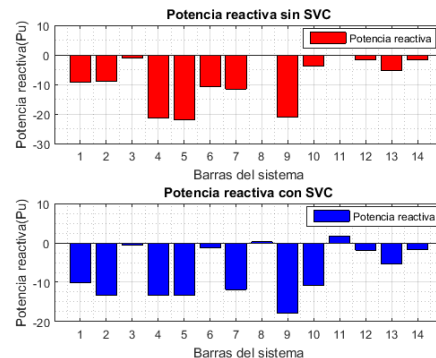


Figura 12. Potencia reactiva sistema IEEE 14.

En la figura 12 se observa que al tener dispositivos SVC presentes en el sistema, la potencia reactiva en las barras se redistribuye y se alivia el flujo reactivo del sistema.

5. Conclusiones

La ubicación óptima de SVC es posible mediante la heurística HS propuesta, disminuyendo el número de dispositivos instalados y reduciendo el costo. Las simulaciones muestran que el costo se reduce para diferentes sistemas de la IEEE. La presencia de dispositivos FACTS en el sistema ayuda a mejorar el perfil de voltaje de algunas barras, acercándose mucho al 1 en (p.u). Además, los flujos reactivos en las líneas se redistribuyen ayudando aliviar los reactivos en los generadores.

Es muy importante parametrizar al Harmony Search con valores adecuados porque de eso dependerá el éxito que se obtenga en el resultado, el parámetro que influye mucho sobre la respuesta es el número de iteraciones ya que mientras menos iteraciones sean, el resultado obtenido se aleja mucho del objetivo. Además, el número de iteraciones también depende del tamaño del SEP, ya que para sistemas de mayor tamaño se tarda un poco más de iteraciones

encontrar el resultado óptimo. Pero con un número alto de iteraciones la heurística funciona bien.

Se podría mejorar la heurística implementando en ella el cálculo de un error, con ello se elegiría el porcentaje de error deseado, a manera de tolerancia. Con el fin de disminuir el número de iteraciones requeridas para la solución.

6. Referencias

- [1] T. Duong, Y. Jiangang, and V. Truong, "Application of min cut algorithm for optimal location of FACTS devices considering system loadability and cost of installation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 979–987, 2014.
- [2] S. Rahimzadeh and M. T. Bina, "Looking for optimal number and placement of FACTS devices to manage the transmission congestion," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 1, pp. 437–446, 2011.
- [3] T. T. Lie and W. Deng, "Optimal flexible AC transmission systems (FACTS) devices allocation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 125–134, 1997.
- [4] K. Ravi and M. Rajaram, "Optimal location of FACTS devices using Improved Particle Swarm Optimization," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 49, no. 1, pp. 333–338, 2013.
- [5] M. Eissa, S. Abdel, and H. Gabbar, "A Novel Approach for Optimum Allocation of FACTS using Harmony Search Technique (HSA)," *Smart Energy Grid Eng.*, pp. 1–6, 2013.
- [6] E. Ghahremani and I. Kamwa, "Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 764–778, 2013.
- [7] E. Ghahremani and I. Kamwa, "Analysing the effects of different types of FACTS devices on the steady-state performance of the Hydro-Québec network," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 2, pp. 233–249, 2014.
- [8] R. P. Singh, V. Mukherjee, and S. P. Ghoshal, "Particle swarm optimization with an aging leader and challengers algorithm for optimal power flow problem with FACTS devices," *Appl. Soft Comput.*, vol. 29, pp. 298–309, 2015.
- [9] R. Srinivasa Rao and V. Srinivasa Rao, "A generalized approach for determination of optimal location and performance analysis of FACTS devices," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 73, pp. 711–724, 2015.
- [10] R. A. Hooshmand, M. J. Morshed, and M. Parastegari, "Congestion management by determining optimal location of series FACTS devices using hybrid bacterial foraging and Nelder-Mead algorithm," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 28, pp. 57–68, 2015.
- [11] K. Kavitha and R. Neela, "Comparison of BBO, WIPSO & PSO techniques for the optimal placement of FACTS devices to enhance system security," *Procedia Technol.*, vol. 25, no. Raerest, pp. 824–837, 2016.
- [12] B. Bhattacharyya and S. Kumar, "Reactive power planning with FACTS devices using gravitational search algorithm," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 6, no. 3,

- pp. 865–871, 2015.
- [13] R. Sirjani, A. Mohamed, and H. Shareef, “Optimal allocation of shunt Var compensators in power systems using a novel global harmony search algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 562–572, 2012.
 - [14] R. Sirjani and A. Mohamed, “Improved Harmony Search Algorithm for Optimal Placement and Sizing of Static Var Compensators in Power Systems,” *2011 First Int. Conf. Informatics Comput. Intell.*, vol. 2, no. 2, pp. 295–300, 2011.
 - [15] A. Kazemi, A. Parizad, and H. R. Baghaee, “On the use of harmony search algorithm in optimal placement of facts devices to improve power system security,” *Eurocon 2009*, pp. 570–576, 2009.
 - [16] H. Mori and H. Tani, “A Tabu Search Based Method for Optimal Allocation of D-FACTS in Distribution Systems,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 41, no. 2, pp. 14951–14956, 2008.
 - [17] S. Ebrahimi, M. M. Farsangi, H. Nezamabadi-Pour, and K. Y. Lee, “Optimal Allocation of Static Var Compensators Using Modal Analysis, Simulated Annealing and Tabu Search,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 39, no. 7, pp. 377–382, 2006.
 - [18] H. Farahmand, M. Rashidinejad, A. Mousavi, A. A. Gharaveisi, M. R. Irving, and G. A. Taylor, “Hybrid Mutation Particle Swarm Optimisation method for Available Transfer Capability enhancement,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 42, no. 1, pp. 240–249, 2012.
 - [19] D. Mondal, A. Chakrabarti, and A. Sengupta, “PSO based location and parameter setting of advance SVC controller with comparison to GA in mitigating small signal oscillations,” *Proc. - 2011 Int. J. Energy, Autom. Signal, ICEAS - 2011*, pp. 324–329, 2011.
 - [20] A. Parizad, A. Khazali, and M. Kalantar, “Application of HSA and GA in optimal placement of FACTS devices considering voltage stability and losses,” *Electr. Power Energy Convers. Syst. 2009. EPECS '09.*, vol. 3, no. 8, pp. 648–654, 2009.
 - [21] J. Baskaran and V. Palanisamy, “Optimal location of FACTS devices in a power system solved by a hybrid approach,” *Nonlinear Anal. Theory, Methods Appl.*, vol. 65, no. 11, pp. 2094–2102, 2006.
 - [22] E. Ghahremani and I. Kamwa, “Maximizing transmission capacity through a minimum set of distributed multi-type FACTS,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–8, 2012.
 - [23] H. R. Baghaee, M. Jannati, B. Vahidi, S. H. Hosseinian, and H. Rastegar, “Improvement of voltage stability and reduce power system losses by optimal GA-based allocation of multi-type FACTS devices,” *11th Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equipment, OPTIM 2008*, pp. 209–214, 2008.
 - [24] X. Yang, *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, Elsevier. London, 2014.
 - [25] Zong Woo Geem, *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*, Springer. Rockville, Maryland, 2009.
 - [26] P. M. Anderson, *Power system control and stability*, First Edit. Iowa State University Press, 1980.

- [27] S.Kamel and A.Cañizares,
“Modeling and simulation of
IEEE 14 bus system with Facts
controllers.,” 2003.